



VII CURSO DE HIDROGEOLOGIA APLICADA

Ríos Rosas, 23. Madrid-3

EMPRESA NACIONAL ADARO  
DE INVESTIGACIONES MINERAS, S.A.

TRAZADORES Y DATAACION DE AGUAS

Prof. Trinidad José de Torres  
Ingeniero de Minas

ABRIL, 1.974

### TRAZADORES Y DATACION DE AGUAS

El empleo de trazadores radiactivos y la datación de agua, habida cuenta que este último sistema no es sino el estudio de los trazadores naturales del agua, es relativamente reciente, sobre todo en España, si se hace excepción del uso limitado que se ha hecho desde hace muchos años de los trazadores no radiactivos.

Aunque a lo largo de este tema podremos apreciar los campos de aplicación y alcance de estos métodos y sus variantes, podemos afirmar en primer término, que el empleo de técnicas de trazadores no constituye la panacea universal que resuelve los problemas hidrogeológicos de una zona, por el contrario se trata de un sistema de comprobación y afinamiento en la resolución de algunos problemas concretos. Los métodos de trazadores poseen unas aplicaciones muy determinadas, por lo tanto resulta un poco aventurado hablar de la aplicación de estos métodos en las primeras fases de un plan de estudios hidrogeológicos, la aplicación de estos métodos debe hacerse, tras el conocimiento geológico detallado de la zona, y el estudio hidrogeológico general. Una vez realizados estos procesos, con el fin de adquirir una información más detallada o para resolver algunos problemas particulares sí puede hablarse de establecer una campaña con el empleo de trazadores.

Ocasionalmente y para resolver problemas definidos, se emplean como único método, tal es el caso de aflores de ríos, - embalses, etc.

Hay que plantearse antes de planificar el empleo de estos métodos, el alcance de la campaña y cual es el problema a resolver, ya que a la hora de realizar la planificación económica hay que decir que se tratan de métodos que emplean técnicas altamente sofisticadas, que precisan la utilización de un personal altamente especializado y que por lo tanto son caros.

Por otro lado, hay que pensar que todos los trazadores son agentes contaminantes del medio ambiente, y que si bien los trazadores coloreados no plantean problemas graves, los salinos sí lo hacen y es todavía más grave si se emplean trazadores radiactivos, expresamente adicionados, los cuales aunque son autodegradables, por desintegración, en algunos casos pueden plantear problemas sobre todo de carácter social. De aquí que se precisen unos estudios previos solventes con el fin de garantizar la evacuación y dilución de los mismos, así como una utilidad verdadera en su empleo, ya que si se adicionan trazadores en forma inadecuada, estos permanecen un tiempo variable en el medio, y a veces pueden llegar a interferir o a complicar posibles estudios posteriores con trazadores, lo cual obligaría a un replanteo de los isótopos a utilizar.

El estudio de trazadores en hidrogeología se puede separar en dos períodos bien diferentes:

El empleo de trazadores no radiactivos coloreados; método actualmente prácticamente en desuso, basado en líneas gene-

rales en la adición de un compuesto de fuerte coloración al agua que se quiere investigar. Este método es en general poco útil ya que requiere una cantidad exagerada de colorante, el cual en la mayoría de los casos es de naturaleza orgánica por lo tanto muy poco soluble en agua fría lo que hace necesario preparar soluciones en caliente, lo cual es fuente de problemas considerables.

Como colorantes habituales se emplean: fluoresceína, dicromato potásico, eosina y anilinas.

Todos ellos presentan problemas de aplicación, ya que fácilmente pueden quedar retenidos en las arcillas, y presentan problemas de contaminación. No obstante su presencia en el agua puede ser determinada con facilidad por métodos colorimétricos.

Todavía se emplea con cierta abundancia la fluoresceína ya que por sus peculiares características puede quedar retenida en estaciones fijas dotadas con sistemas fluocaptadores, los cuales no requieren la continua vigilancia precisa al emplear otros colorantes. Un fluocaptor barato y de buenos resultados consiste en una malla de cobre rellena con carbón activado, sumergida en la corriente en la que se supone aparecerá el colorante, transcurrido un período de tiempo variable se recoge el carbón activado y si han circulado aguas con trazas de fluoresceína estará habra quedado absorbida por el carbón activado. Una vez liberada por solución alcohólica, se podrá ver con un fluoroscopio (lámpara ultravioleta) si realmente hay o no indicios del colorante. Por supuesto este método es puramente cualitativo.

Como dato anecdótico, la primera gran comprobación de un problema hidrogeológico por coloración con fluoresceína, tuvo lugar en el Agujero del Toro, en los Pirineos españoles, gran sumi

---

dero que luego ya en la vertiente francesa se transforma en las Fuentes del Garona, alimentando al río de este nombre en todo - su curso superior, este estudio fue realizado por Norbert Gaste<sub>r</sub>et uno de los pioneros de la hidrogeología karstica francesa y mundial.

También pueden emplearse como trazadores sustancias quí<sub>m</sub>icas comunes tal es el caso de los cloruros, los cuales inyec<sub>t</sub>ados en cantidades suficientes modifican la resistividad del - agua, la disminuyen, resulta pues teóricamente fácil determinar su presencia. En la práctica no es tan sencillo ya que los cloruros son muy frecuentes en todas las aguas y se puede fácilmen<sub>t</sub>e incurrir en errores interpretativos de aquí que su empleo - tampoco sea muy frecuente.

La falta de iones cloruro, o una disminución del conteni<sub>d</sub>o, puede ser por el contrario un indicio realmente importante cuando se investigan salidas de agua submarinas, ya que enton<sub>c</sub>es al existir aguas con contenidos menores de sales la resisti<sub>v</sub>idad aumenta, y fácilmente pueden determinarse áreas con una - resistividad mayor y por lo tanto con unas mayores posibilida<sub>d</sub>es para la búsqueda de agua. Igualmente se altera el pH, lo cual unido al método de resistividad da dos buenos métodos de - medida para estas anomalías.

Podemos concluir pues que los trazadores no radiactivos se emplean muy poco y debido a la fidelidad y mayor precisión - de los métodos modernos con trazadores radiactivos, van quedand<sub>o</sub> cada vez más postergados.

#### TRAZADORES RADIATIVOS

Podemos dividir en dos grandes grupos los trazadores ra<sub>d</sub>iactivos:

Trazadores radiactivos naturales.

Trazadores radiactivos artificiales.

Los trazadores radiactivos naturales, como su nombre indica se encuentran como tales en la naturaleza por lo tanto la base del estudio de aguas radica en las variaciones de los contenidos de estos radioelementos.

De interés hidrogeológico son fundamentalmente los siguientes:

Carbono - 14, Tritio ó Hidrógeno - 3, Oxígeno - 18, Radon, etc.

Los más importantes Carbono - 14 y Tritio, se producen o mejor dicho se han producido en las explosiones nucleares en la atmósfera las cuales produjeron concentraciones anormales - en la atmósfera de Carbono - 14 y del Tritio, el Carbono - 14, también se produce en forma gradual en la alta atmosfera debido a la acción de los rayos cósmicos sobre el Nitrógeno - 14 se combina instantaneamente con el oxígeno para dar dióxido de carbono y finalmente es absorbido por las plantas en la fotosíntesis, pasando de esta forma a formar parte de tejidos orgánicos en el ciclo de la vida, también forma parte del anhídrido carbónico responsable del mecanismo formador de bicarbonatos - solubles a partir de carbonatos insolubles, de aquí su interés en hidrogeología.

El Tritio, que forma moléculas de agua THO, presenta - por tanto gran interés en cuanto a datación de aguas aunque su presencia en la naturaleza se debe fundamentalmente a la acción

de las explosiones nucleares en la atmósfera, y en menor grado a la acción de neutrones sobre oxígeno y nitrógeno.

Los trazadores radiactivos artificiales, se obtienen en las centrales nucleares, por los costosos problemas de refinación son muy caros y difíciles de conseguir. Se adicionan al agua - en forma de compuestos solubles.

Veamos a continuación algunas definiciones sobre radiactividad:

Denominamos isótopos a aquellos nuclidos que tienen el mismo número de protones y distinto el de neutrones.

Isótopo estable, es aquel que permanece inalterado sin desintegrarse y por tanto sin emitir radiaciones durante un período muy largo de tiempo.

En hidrogeología se estudian dos isótopos estables: el oxígeno - 18 y el Deuterio o agua pesada.

Los isótopos radiactivos por el contrario no son estables y se transforman en otros elementos por emisión de radiaciones.

Ya sabemos pues que los elementos radiactivos con el tiempo se desintegran dando lugar a otros nuclidos estables o no (desintegración en serie). Esta desintegración obedece a un fenómeno de carácter probabilístico y por lo tanto no está influenciada por los átomos vecinos o por efectos de orden físico ni químico.

Por tanto podemos expresar la ley fundamental de la radiactividad  $N=N_0 \cdot e^{-\lambda t}$ .

A se la denomina constante de desintegración y es un factor que nos indica la cantidad de átomos que se desintegran por unidad de tiempo.

Denominamos período de desintegración al tiempo necesario para que la actividad ( $dN/dt$  desintegraciones / segundo) sea la mitad de la actividad inicial. Igualmente puede expresarse como el tiempo necesario para que el número de átomos radiactivos sea la mitad de los que había inicialmente ya que la actividad es proporcional al número de átomos radiactivos.

Como unidad de actividad se emplea el CURIO, definida como la actividad de una muestra en la que se desintegran  $3,7 \times 10^{10}$  átomos por segundo empleándose los submúltiplos milicurios y microcurios.

#### Formas de desintegración:

Los nuclidos radiactivos pueden desintegrarse por tres tipos de emisiones:

Emisión de partículas alfa: núcleos de átomos de helio, sobre todo en nuclidos pesados. No se suelen emplear en hidrogeología debido al escaso poder de penetración que poseen.

Emisión de partículas beta: se tratan de partículas de masa idéntica a la del electrón aunque su carga eléctrica puede ser negativa (negatrón) o positiva (positrón).

Los negatrones se emiten en aquellos nuclidos con mayor número de neutrones que el elemento estable y por el contrario -



los positrones se emiten en nuclidos con menor número de neutrones que el elemento estable, aunque en ambos casos la radiación beta se emite según un espectro continuo de energías.

En otras ocasiones la desintegración tiene lugar por captura electrónica, sobre todo en núcleos con déficit de neutrones: un electrón, generalmente de la capa más interna, es captado por el núcleo  $p + e \rightarrow n$ ; de esta forma se compensa el déficit de neutrones y al llenarse el hueco de la capa más interna con un electrón procedente de otra más externa, se emite el rayo X característico del elemento en cuestión.

**Emisión de rayos gamma:** La emisión de rayos gamma tiene lugar como consecuencia de la emisión de rayos alfa, beta, o por la desintegración por captura electrónica. En estas formas de desintegración, ocurre que el nuclido resultante se encuentra excitado con un nivel de energía superior al que le corresponde en estado normal, el paso del estado excitado al normal, lo realiza mediante una emisión de rayos gamma, los cuales no son sino cuantos de energía, del mismo tipo que los RX o los ultravioleta etc...

La emisión de partículas gamma sólo altera el estado energético del nuclido y no su constitución.

La radiación electromagnética, puede ser a su vez responsable de una serie de interesantes fenómenos al incidir sobre una serie de átomos vecinos:

#### Efectos fotoeléctricos:

El efecto fotoeléctrico consiste en la interacción del fotón con un electrón de una capa cercana al núcleo, si la energía del fotón es superior a la de ligazón del electrón con

el núcleo, éste sale expulsado del átomo. A continuación el hueco dejado por el fotoelectrón saliente se llena con un electrón de capas más externas emitiéndose el correspondiente rayo X característico.

La posibilidad de producción de un fotoelectrón está en relación directa con el número atómico del átomo y en relación inversa con la energía del fotón absorbido fotoeléctricamente.

#### Efecto Compton:

Cuando la interacción electrón de un átomo-fotón no se produce en las capas de electrones internas sino en las externas, al incidir el fotón pierde parte de su energía, la cual emplea el electrón para salir expulsado de la órbita; por otra parte el fotón se desvía.

El efecto Compton predomina con fotones de energías intermedias y por tener lugar con electrones situados lejos del núcleo, es un fenómeno independiente del número atómico del elemento en el que se produce la interacción.

#### Producción de pares:

La producción de pares de partículas, se basa en el fenómeno de inalteración del fotón con un núcleo desdoblándose el primero en un electrón y un positrón; se trata pues de una conversión de energía en materia, produciéndose ambas partículas, no a partir de las capas de electrones donde no hay positrones, ni del núcleo donde no existe ninguna de las dos partículas, sino del fotón.

La producción de pares, requiere fotones de gran energía y núcleos de gran tamaño, ya que este fenómeno sólo puede tener lugar dentro del campo electroestático del núcleo.

#### Técnicas de medida:

La detección de radiaciones se basa en su interacción con la materia y la consiguiente producción de fenómenos de ionización y de excitación. Cuando la radiación incide sobre el detector, éste lo registra casi siempre como un impulso - de tensión, el cual una vez amplificado y clasificado se lleva a un equipo electrónico donde se transforman en cuentas - por minuto. A través de esta velocidad de recuento, se puede conocer la actividad de la muestra o la actividad específica del determinado isótopo radiactivo en el medio. Se pueden distinguir los siguientes tipos de detectores:

#### Detectores Geiger Muller:

Básicamente es una cámara de forma cilíndrica con un filamento central aislado de las paredes, la cámara está rellena con un determinado gas: casi siempre un gas inerte, argón, neón, nitrógeno, etc.

Entre pared y detector se aplica un potencial determinado para cada aparato cuando penetra la partícula ionizante dentro del detector, produce en su trayectoria un elevado número de pares, dirigiéndose los de carácter positivo a las - paredes de la cámara (cátodo) y los de carácter negativo al filamento (ánodo). Los negativos (electrones) antes de llegar al filamento puede adquirir tanta velocidad que dan lugar a nuevos pares a partir de los átomos del gas de llenado, con lo cual el gas se hace conductor. La corriente que circula - entre ánodo y cátodo produce en la resistencia de carga, una caída de tensión  $iR$ . El impulso eléctrico tiene la forma de

la figura (Figura del impulso - tensión).

Los contadores proporcionales, tienen una disposición parecida, y se basan en idéntico fenómeno: la ionización de gases, pero sus ventajas fundamentales son las siguientes en relación con el contador Geiger-Muller.

En los contadores proporcionales, la altura de los impulsos (volts) es diferente en relación con la energía de las partículas; por tanto, las partículas alfa producen mayores impulsos que las beta y éstas que las gamma. Además, para radiaciones del mismo tipo los impulsos son mayores con la energía.

Por el contrario, en los contadores Geiger Muller, la altura de los impulsos es más o menos la misma.

Los detectores Geiger Muller poseen un prolongado tiempo muerto, en el cual, pese a la llegada de nuevos impulsos, éstos no son registrados, esto se debe a que cada impulso tiene una duración de 30/150 microsegs, y el impulso sólo termina cuando han sido recolectados todos los iones positivos; de aquí que con grandes velocidades de recuento funcionen mal. Por el contrario, en los contadores proporcionales, al colectarse los electrones, la duración del impulso es menor al microseg, por tanto se trata de un sistema denominado no paralizable.

La única desventaja del contador proporcional, es el pequeño tamaño de los impulsos, lo cual hace precisa la colocación de un amplificador de salida con el fin de que temen una altura suficiente para el registro.

En los contadores proporcionales que se dedican a mediciones de actividades muy bajas con radiaciones beta muy

blandas, se ha comenzado a usar un contador proporcional en el que se introduce la muestra con el radioelemento formando parte de una molécula gaseosa mezclada con el gas de llenado. Llevando además de los contadores interiores, detectores en el anillo protector que evitan las radiaciones externas que atraviesan la protección de plomo o acero, ya que van conectados juntos a los interiores, a una unidad electrónica de anticoincidencia que rechaza los impulsos generados simultáneamente en los detectores del anillo de protección y en los de medida.

A pesar del bajo fondo de los contadores proporcionales 1-2cpm a veces, sobre todo al medir muestras de muy baja actividad, se precisa enriquecerla isotópicamente, lo cual se logra por electrolisis en el caso del tritio o por decantación gravitacional o centrífuga en el caso del carbono -14.

#### Detectores de centelleo:

Los detectores de centelleo se emplean con mucha más frecuencia que el detector Geiger-Muller, debido a que presentan una mayor sensibilidad para la radiación gamma.

Esencialmente constan de un cristal, normalmente de  $\text{NaI}$  inactivado con talio, en el que al incidir un rayo gamma se produce una liberación de luz. Este destello luminoso es captado por el fotocátodo del tubo fotomultiplicador, que responde al estímulo luminoso liberando un número de electrones determinado; éstos electrones, debido a la acción del campo eléctrico, inciden con alta velocidad sobre el primer dínodo, liberando un haz de electrones de mayor intensidad. Un efecto similar se produce en los restantes dínodos presentes, hasta que el haz electrónico es captado por el ánodo colector, éste flujo de electrones de gran intensidad, pasa por la resistencia  $R$  de carga, produciendo una caída de tensión  $iR$ .

dando un impulso eléctrico registrable en el aparato de medi  
da.

Mediante el empleo de discriminadores adecuados, pueden limitarse una serie de ventanas que permiten medir va  
rios emisores a la vez, el discriminador inferior impide el registro de impulsos inferiores al valor fijado y el discriminador superior impide mediante la unidad de anticoincidencia el registro de los valores superiores.

Desplazando la ventana se obtiene el espectro completo con el fotópico indicativo de absorciones completas de ra  
yes gamma.

El centelleo con fósforo líquido, es el método de cen  
telleo algo similar a lo que los contadores proporcionales - con mezcla de gases al método de contadores proporcionales - convencional:

En este caso, en vez de tener un cristal activado, en el que al incidir la radiación se produce una respuesta lumi  
nosa, las moléculas con partículas emisoras de radiaciones y las moléculas emisoras de luz están íntimamente mezcladas de tal forma que la dispersión de la radiación es mucho me  
nor. Este método resulta particularmente eficaz para los emi  
sores de radiaciones beta muy blandas y con actividades muy bajas, el C-14 y el H-3.

Una de las dificultades de este sistema es que los cen  
telleadores sólo son solubles en sustancias orgánicas, mientras que las muestras no lo son, con el fin de crear una mis  
cibilidad total, que favorezca el contacto íntimo entre las moléculas radiactivas y las moléculas de centelleador, se ha de sintetizar a partir de la materia inorgánica un producto soluble normalmente en tolueno.

Para el carbono 14 el proceso de síntesis es el si guiente: reducción de la muestra por combustión o ataque con ácido a  $\text{CO}_2$ . Combustión en vacío de litio reactivo fundido con el  $\text{CO}_2$  generado para obtener acetileno y síntesis del mismo de benceno en catalizador de alúmina-vanadio, el benceno es total mente soluble en benceno.

Para el tritio el proceso es semejante, salvo que en vez de agua normal, se adiciona agua tritiada.

Como puede verse, se trata de un proceso engorroso en el que además se emplean elementos caros; el litio es de precio - elevado y no siempre fácil de obtener debido a estar considerado como metal estratégico; por otra parte, la reacción de sín tesis-acetileno-benceno, es muchas veces caprichosa con unos rendimientos en benceno anormalmente bajos en ocasiones, de aquí que en muchas ocasiones se intente prescindir de este sis tema.

Se han intentado otros muchos sistemas de preparación de muestras entre los que cabe citar los siguientes:

Absorción del  $\text{CO}_2$  por hiamina (amina terciaria de alto - peso molecular) - tiene el inconveniente de ser poco estable.

Empleo de suspensión de la muestra finamente dividida en un agente gelificante si se trata de agua tritiada, se haría - una emulsión. Se emplean como agentes gelificadores el Tritón (para agua tritiada) y el Cab-o-Sil y el Tixcin para muestras de C-14.

Uso de muestras impregnadas en papel, a veces en vez de papel normal, papel electroforético, el papel se introduce previamente impregnado en KOH en un recipiente en el que se ha liberado el  $\text{CO}_2$ .

También se ha sugerido el empleo de centelleadores en suspensión: así se han empleado con cierto éxito cristales - planos de violeta de antraceno. Otras veces se han empleado perlas de centelleador dispersas en poliestireno en el que - se hace pasar una solución acuosa con los emisores de radiaciones beta.

En estos sistemas, el principal problema radica:

a) el fondo: es decir, el conteo obtenido empleando sustancias no radiactivas, para evitar el fondo se emplea la técnica de coincidencia, es decir, se emplean dos tubos - fotomultiplicadores desechándose toda medida no simultánea, - que provendría de emisión termiónica de algunos de los tubos o por ruido eléctrico.

b) el apagado (quenching)

A veces ocurre que la emisión luminosa del centelleador se pierde, sin llegar a los tubos fotomultiplicadores. - Como no puede evitarse este fenómeno, se ha de corregir mediante el empleo de muestras patrón de actividad conocida, de idéntica composición a la solución muestra y en las que la eficiencia  $E = \text{C.P.M.}/\text{D.P.M.}$  se determinan automáticamente. Igualmente se utilizan soluciones patrón para la determinación del fondo de la muestra.

Existe ya una mecánica operativa con carácter rutinario que permite evitar los posibles errores debidos a los fac



tores ya citados, obteniéndose fondos que oscilan entre 10 - 15 c.p.m, pudiéndose medir actividades de una o dos desintegraciones por minuto.

Vamos a ver realizar algunas consideraciones sobre los trazadores naturales. El Tritio, ya sabemos que es el único radioisótopo del hidrógeno, aunque en párrafos anteriores hemos hecho ya mención de que su producción se debe casi exclusivamente a las explosiones termonucleares (bomba de hidrógeno), al igual que el C-14 también se genera en las capas más altas de la atmósfera por interacción de protones de elevada energía con el oxígeno y el nitrógeno, llegando a dar concentraciones de hasta 10 UT (una UT es una concentración de un átomo de Tritio por  $10^{13}$  de hidrógeno normal), variando su concentración con la situación geográfica y la época del año. Esta producción es permanente.

Las explosiones termonucleares llevadas a cabo a partir de 1952 en la atmósfera han producido un notable incremento en las condiciones de concentración de Tritio en el agua meteórica, llegándose a alcanzar valores de hasta 10.000 UT.

La presencia de Tritio en las precipitaciones, produce un marcado "natural" del agua. Como el Tritio general es espontáneamente en la atmósfera es muy poco en relación con el generado en las explosiones termonucleares y como su periodo de desintegración es muy corto, puede afirmarse sin lugar a dudas que todas las aguas de fecha anterior a 1952 tienen una concentración muy baja de Tritio, pudiéndose afirmar, si se trata de aguas con una actividad detectable de Tritio que al menos parcialmente poseen aguas posteriores a 1952.

Evidentemente, para poder datar un agua con exactitud se ha de tener una relación bastante precisa sobre las preci-

pitaciones locales en los años precedentes. Esta información es facilitada por la Organización Internacional para la Energía Atómica.

Las concentraciones de Tritio en las aguas han sufrido grandes oscilaciones debido a numerosas causas entre las que cabe citar:

Frecuencia e importancia de las explosiones termonucleares en la atmósfera. Fuertes variaciones estacionales debido principalmente al mayor peso de la molécula de agua tritiada, el máximo se suele presentar hacia la primavera-verano.

También varía mucho las concentraciones con la latitud: Se ha podido observar:

Concentraciones mucho más elevadas en el Hemisferio - Norte que en el Sur. Un crecimiento de la concentración en la latitud. Un mayor contenido de tritio en los interiores - de los continentes, ya que hay en el mar un rápido intercambio pasando el tritio al agua marina.

Las condiciones meteorológicas locales también afectan mucho a la concentración de Tritio ya que las nubes procedentes de evaporación continental llevan concentraciones de tritio mucho mayores.

El carbono - 14:

Ya hemos hablado anteriormente. Este isótopo se genera en la alta atmósfera a partir del nitrógeno entrando a formar parte del ciclo de la vida con gran rapidez.

Se supone su concentración atmosférica constante en -

los últimos 10.000 años, admitiéndose que las variaciones en épocas anteriores, si las hubieron, debidas a una variación en el flujo de rayos cósmicos o a situaciones paleoclimatológicas, glaciaciones, no influenciaron su contenido en más de un 10%.

Debido a que este radioisótopo se intercambia rápidamente con los seres vivos, se admite con fundamento que su actividad específica, se mantiene constante para cualquier lugar de la Tierra, sin que la influyeran ninguno de los factores que anteriormente vimos, afectasen los contenidos en Tritio.

Se emplea el C-14 para la datación de aguas, en función de los carbonatos disueltos, y para dataciones en formaciones recientes.

No obstante, hay que advertir que la relación  $\text{CO}_2/\text{CO}_2$  se ha alterado considerablemente en los últimos años. Por una parte debido a la acción de la combustión de grandes cantidades de combustibles antiguos que han vertido a la atmósfera ingentes volúmenes de  $\text{CO}_2$  y por otra las explosiones nucleares atmosféricas, que han producido, en su liberación de neutrones, grandes cantidades de C-14. Esta contaminación también se puede emplear, como el tritio, para la datación de aguas recientes.

Citaremos finalmente los isótopos naturales del hidrógeno y del oxígeno: Deuterio y Oxígeno 18, los cuales habitualmente se encuentran en cantidades apreciables en la composición del agua.

Las moléculas de agua que poseen uno de estos dos isótopos, son muchos más pesados que las del agua normal, por ello se produce a lo largo del ciclo un fraccionamiento.

La causa de este fraccionamiento, radica en sus diferentes presiones de vapor, siendo menor en la fase de vapor las concentraciones de moléculas de agua con cualquiera de dos isótopos.

Existen numerosos condicionantes de la variación del contenido en el agua de lluvia, podrían sintetizarse en la forma siguiente:

Distancia al océano: a medida que se adentra el vapor de agua hacia el interior de los continentes, se hace más ligero, por la precipitación diferencial de las moléculas más pesadas.

Temperatura: es mayor el fraccionamiento cuanto menor es la - temperatura de evaporación, por ello varían las concentraciones con la situación geográfica.

Intercambio con el vapor de agua atmosférica, que es pobre en moléculas en los isótopos, habiendo un intercambio hasta alcanzar concentración de equilibrio.

DETERMINACION DE LA RECARGA PARA EL CASO DE ACUIFERO LIBRE  
(MEDIO TIPO DE PISTON)

Si se trata de acuíferos confinados se han de recoger las muestras en la dirección supuesta para el flujo, la zona de máxima concentración indicará la situación aproximada de las aguas correspondientes a 1963 (fig. 1).

Si los acuíferos son libres, será más fácil resolver el problema, ya que habrá una cierta estratificación del agua, la toma de muestras deberá también de comprender la zona no saturada. Identificando un pico de máxima actividad p. ej. - el de 1963 la zona comprendida entre el pico y la superficie es sin duda la recarga desde 1963 a la época de la medición, obteniéndose así la recarga anual media. Esto puede indicarse con las integrales:

donde  $C(t)$  es la función que rige la concentración de tritio desde 1952

$W(t)$  es la función que rige la infiltración.

Conocidas las infiltraciones medias anuales (fig. 2)

(W) función correspondiente a la recarga

$$C_1 = \int_{1952}^{t_0} C(t) W(t) dt = UT \times \text{metro} \quad \left| \quad W = \frac{C_1}{C_2} \text{ (metros año)} \right.$$

integral de (1)

$$C_2 = \int C(t) dt = UT \times \text{años} \quad \left| \quad \begin{array}{l} \text{supuesta la recarga} \\ \text{constante da la recar} \\ \text{ga media anual.} \end{array} \right.$$

#### Modelo de mezcla total:

Este modelo implica la no existencia de gradientes verticales de isocronía del agua.

Este modelo resulta especialmente indicado para el C-14, ya que éste, en su concentración en el agua que alimenta al acuífero se puede considerar como constante, por lo tanto podremos decir, que las diferencias entre las concentraciones en las zonas de alimentación del acuífero y las drenantes, se deben, única y exclusivamente, a la desintegración radiactiva, dando pues el tiempo de renovación del acuífero. Con este dato y con el volumen estimado de agua almacenada, se calcula la recarga.

En el caso del tritio, el problema ya es algo más complejo, ya que sus concentraciones si han sido muy variables, pese a admitir un mezclado total, puede llegar a identificarse unos de los "picos correspondientes a 1958 y 1963 en la zona de descarga.

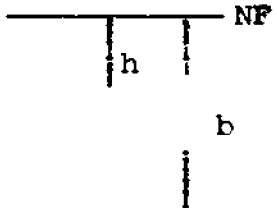
#### Modelo de mezclado parcial:

Este es uno de los casos más complejos que pueden llegar a presentarse, ya que entonces previamente a cualquier datación, se han de realizar experimentos con trazadores expresamente adicionados con el fin de intentar averiguar el coeficiente de dispersión del acuífero. Con este parámetro se pueden reajustar los tiempos de tránsito basados en los gradientes de concentración del isótopo.

#### Modelo de Vogel:

Vogel supone para su modelo la existencia de un acuífero libre, con recarga  $W$ (m/año) uniforme y un espesor  $b$  constante.

En estas condiciones, la edad  $t$  del agua a una altura  $h$  del zócalo impermeable, viene dada por la expresión:

$$t = \frac{pb}{w} \ln \frac{b}{h}$$


siendo  $p$  la porosidad

$b$  espesor del acuífero

$h$  altura de la toma de muestras.

Variando pues la antigüedad del agua en forma exponencial respecto la profundidad.

La edad media  $t_m$  corresponderá a una altura  $h = b / e$  - siendo pues  $t_m = pb/W$ .

De forma idéntica la edad en el punto medio del acuífero será  $t_{1/2} = p \cdot b/W \ln 2 = 0,693 p \cdot b/W$ .

Conociendo pues la edad a una altura  $h$  cualquiera del acuífero la recarga puede calcularse con las ecuaciones anteriores.

Si por el contrario el acuífero está formado por rocas compactadas, la situación es diferente, en este tipo de acuíferos, la porosidad disminuye con la profundidad en forma exponencial variando la edad en forma lineal según la expresión:

$t = p_0 \cdot d/W$  siendo  $d$  la profundidad desde la zona piezométrica y  $p_0$  la porosidad en la zona piezométrica.

Por otro lado, si siguiendo este modelo, datamos el agua de una surgencia evidentemente hay una mezcla de aguas, pero teniendo en cuenta la homogeneidad del acuífero y la desintegración exponencial del isótopo, Vogel propone una relación entre la salida y la edad de salida y la edad media en el acuífero de:

$$r = \frac{1}{\lambda} \ln (1 + t_m) = \frac{1}{\lambda} \ln \left( 1 + \frac{pb}{W} \right) \text{ pudiéndose calcular así la recarga.}$$

Problemas que presenta el cálculo de antigüedades iniciales CO para el C-14 en antigüedades de agua.

Hay que admitir que no todos los iones bicarbonato disueltos, provienen de la atmósfera, sino que parte de ellos - lo hacen de rocas de edad superior a los 50.000 años y que por tanto diluyen la concentración inicial de C-14. Tamers indica que todo el CO<sub>2</sub> disuelto más la mitad de los carbonatos, son de origen biogénico.

Calculando la edad por la expresión:

$$t = 8035 \ln \frac{(^{14}\text{C muestra})}{(^{14}\text{C patrón})} + \frac{3}{4} 8035 \ln \frac{(C \text{ total}) - V_2(\text{CO}_3\text{H}^-)}{(C \text{ total})} + \frac{1}{4} 8035 \ln \frac{(C \text{ total}) - \frac{1}{2} (\text{CO}_3\text{H}^-)}{(C \text{ total})}$$

8038 es la expresión  $t_{1/2}/\ln 2$  para el C-14  
(C<sup>14</sup> muestra) y (C<sup>14</sup> patrón) actividades para la muestra de agua y para el patrón

Vegel emplea un criterio basado en resultados experimentales, admitiendo que entre el 80 y el 90% está el factor real de dilución del C-14, quedando la expresión de la edad definida por la ecuación:

$$t = 8035 \ln \frac{(^{14}\text{C muestra})}{(0,85 \pm 0,05) (^{14}\text{C patrón})}$$

Pearson se basa en la relación entre isótopos estables C<sup>13</sup>/C.<sup>n</sup>.



Si se considera que casi todo el carbónico disuelto por el agua es de origen biogénico, tendrá una desviación su contenido de  $C^{13}$  respecto al patrón de:

$$S^b C_{\text{suelo}} = \frac{R_m \cdot R_p}{R_p} \times 10^3 = -(25 \pm 2)\%$$

$R_m$  y  $R_p$  son las relaciones  $C^{13} / C^{12}$  en el  $CO_2$  biogénico del suelo patrón. Con una actividad específica igual a la del carbono moderno, los carbonatos del medio tendrán una desviación cero y una actividad específica cero.

Por tanto, si el agua disuelve carbonatos  $S^{13}C$  disminuye en idéntica proporción que aumentan las cantidades de carbonatos en agua. Por tanto, si designamos como (C inicial) la concentración debida al carbono biogénico disuelto en la infiltración, y con (C final) la existente en la muestra extraída en el acuífero  $\frac{S^{13}C_{\text{muestra}}}{-(25 \pm 2)} = \frac{(C_{\text{inicial}})}{(C_{\text{final}})} = F$

El valor corregido de la actividad específica inicial se obtiene multiplicando la actividad específica del carbono moderno por F.

Viniendo, dada la antigüedad, por la expresión:

$$t = -8035 \ln \frac{(C^{14}_{\text{muestra}})}{F(C^{14}_{\text{patrón}})}$$

El estudio de los contenidos en oxígeno 16 y en deuterio, es muy interesante, sobre todo si se intentan reconocer cuales son los orígenes de las aguas que aparecen en algún tipo de surgencia.

Así p. ej. se pueden identificar aguas que han estado sometidas a un termalismo aunque su temperatura en el zona en que aparecen es superficie sea normal.

Esto se debe a que en la zona de fuerte calentamiento, se produce un notable enriquecimiento en el contenido de oxígeno 18, el deuterio prácticamente no se altera, debido al intercambio isotópico entre el oxígeno del agua y del medio.

También pueden identificarse aguas muy antiguas debido fundamentalmente a que en las glaciaciones cuaternarias las aguas infiltradas dieron concentraciones anormalmente altas de estos dos isótopos.

También pueden estudiarse los orígenes de agua con elevados contenidos en cloruros:

Si proceden a una intrusión marina tienen un alto contenido en ambos isótopos.

Si son aguas procedentes de infiltraciones, entran empobrecidas en los dos isótopos.

Si se trata de agua procedente de lagos hay una mayor abundancia relativa de oxígeno 18 respecto al deuterio, debido al fraccionamiento.

También podemos identificar plenamente cual es el origen de la recarga, si el agua proviene de un lago embalse o río en los que fácilmente hay un fraccionamiento por evaporación, podremos medir un mayor contenido de los dos isótopos, que si se tratase de aguas procedentes de precipitaciones atmosféricas.

Igualmente puede verse la influencia en la recarga de la fusión de hielos y nieves, ya que con la altitud, lugar donde generalmente se concentra la nieve, se produce una disminución del contenido isotópico.

---

Por otra parte también se puede estudiar la influencia estacional en la infiltración. Ya sabemos que el contenido isotópico varía estacionalmente, comparando los resultados de las mediciones de aguas subterráneas en cuanto a sus contenidos - isotópicos y las de las aguas superficiales.

### ZONA NO SATURADA

Resulta de marcado interés poder medir la migración de la humedad en la zona no saturada, ya que el conocimiento de este dato nos permite conocer la infiltración y la recarga.

Basándonos en el empleo de fuentes de rayos gamma, y estudiando la atenuación de la radiación podemos llegar a resultados positivos en las medidas.

No obstante también se emplean trazadores radiactivos.

Debido a las peculiaridades del flujo en esta zona, se hace necesario utilizar solamente trazadores incorporados directamente a la molécula de agua, es decir, isótopos del oxígeno y del hidrógeno.

De todos los isótopos utilizables, el más adecuado es el tritio, ya que puede medirse fácilmente por centelleo, requiriendo el oxígeno 18 y el deuterio costosas medidas en espectrógrafos de masas.

Por tanto, se emplea casi exclusivamente el tritio.

El agua tritiada se inyecta en la zona no saturada a una cierta profundidad y bastantes puntos separados entre sí. Al cabo de cierto tiempo se produce, debido a la difusión, un solapamiento entre las zonas inyectadas de forma que queda el trazador distribuido más o menos según un plano.

La inyección se ha de realizar siempre por debajo de la zona de suelo vegetal y de tal manera que la evaporación sea prácticamente nula.

Posteriormente se realizan perforaciones por debajo de la capa marcada de forma tal que extrayéndose el agua de las muestras, se determine el pico de máxima actividad con el desplazamiento del agua y la dispersión de la zona marcada (fig.3).

Por supuesto que las consideraciones hasta ahora realizadas son sobre un plano puramente teórico, ya que en el planteamiento inicial se ha supuesto un proceso perfectamente estratificado y donde no hay mezcla del agua tritiada con otras aguas ascendentes o descendentes. Por tanto con el fin de disminuir los márgenes de errores, se ha de aumentar en lo posible el área marcada con el fin de que puede considerarse representativa de la zona a estudiar.

Igualmente se ha de controlar el proceso durante un tiempo bastante prolongado se puede obtener errores inferiores al 10%.

De todas formas, se ha de admitir que se produce una dispersión de la zona marcada, dispersión que se puede atribuir a las causas siguientes:

Intercambio molecular entre el agua estática y dinámica, pueden retrasarse las moléculas de agua tritiada.

Diferencia de conductividad de los poros.

Difusión molecular.

Hoy día se tiende a estudiar la dispersión del tritio termonuclear, como ya se vió.

## ZONA SATURADA

Donde realmente se alcanzan resultados verdaderamente llamativos y exactos con el empleo de trazadores, es en el estudio de la zona saturada.

Así pueden obtenerse datos respecto a los siguientes problemas:

Determinación de parámetros: Porosidad eficaz, permeabilidad, transmisibilidad y dispersividad.

Estudio del comportamiento hidrodinámico: Velocidad horizontal, sentido de desplazamiento, medida de flujos verticales en piezómetros.

Medida de la porosidad eficaz:

Se bombea en el pozo durante cierto tiempo agua a caudal constante, se inyecta el trazador por el piezómetro situado a la distancia  $r$  del pozo (fig. 3).

Para que la medición sea correcta se ha de eliminar toda el agua no ligada al medio.

Obtendremos así la porosidad eficaz de un cilindro de radio  $r$  y altura  $b$ , siendo  $b$  la potencia del acuífero. Este volumen equivale al producto del volumen del cilindro multiplicado por la porosidad eficaz  $s$   $V = \pi r^2 b s$ .

Si el trazador tarda un tiempo  $t$  en llegar al pozo de bombeo medido desde el tiempo de inyección (fig. 4), se tendrá:

$$Q_t = \pi r^2 b s \quad \text{y} \quad s = \frac{Q_t}{\pi r^2 b}$$

Las condiciones operacionales exigidas son las siguientes:

Líneas de flujo piezómetro-pozo de bombeo han de ser radiales, para ello la velocidad producida por el bombeo ha de ser mayor que la del flujo natural del agua, por tanto la distancia r habrá de ser lo bastante pequeña como para que se cumpla esta condición.

El volumen del cono de depresión creado por la bomba, ha de ser pequeño en relación con el volumen del cilindro de radio r y altura b, lo que exige que la potencia del acuífero sea menor que la distancia r.

Lógicamente se considerará un medio isótropo en lo que a porosidad y permeabilidad se refiera.

El pozo de bombeo deberá de alcanzar el zócalo impermeable y su diámetro despreciable en relación con la distancia pozo-piezómetro.

A pesar de las consideraciones anteriormente apuntadas, pueden producirse errores, fundamentalmente debido a la falta de isotropía del medio. Estas isotropías se pondrán fácilmente de relieve realizando esta medida en otros puntos y observando si se desvían mucho entre sí los valores hallados; en el caso - de que así sea no se puede tomar siquiera como dato representativo, la porosidad media obtenida a partir de varias determinaciones.

A veces una porosidad eficaz anormalmente grande orientada en una misma dirección, tras varias mediciones en varios piezómetros alineados debe interpretarse como la presencia de una discontinuidad importante tipo falla.

Como medida de seguridad y con el fin de evitar la absorción del material marcado por partículas del medio, es de interés realizar inyecciones simultáneas con trazadores diferentes.

Si se trata de medios muy heterogéneos, conductividad en masa o por fisuras importantes, el agua llegará al pozo de bombeo por una serie de vías diferentes y en el registro aparecerán varios picos desfasados entre sí, indicadores de las llegadas de aguas marcadas en diferentes tiempos a causa de las diferentes longitudes recorridas, por supuesto que en estos casos no se podrá determinar la porosidad.



## PERMEABILIDAD Y TRANSMISIBILIDAD

Acuífero homogéneo no confinado (método Wiewenga) (fig. 5)

Se bombea agua desde el pozo 4, se inyecta trazador por el piezómetro 1 y se mide en los piezómetros 2 y 3, en forma periódica, desplazando verticalmente el detector para detectar la nube de trazador que se desplaza paralela a la superficie piezométrica obteniéndose las curvas de la (fig. 6) para distintos tiempos. Los máximos coincidentes en la vertical, nos dan la profundidad del centro de la nube del trazador en cada uno de los piezómetros. La relación  $(h_2 - h_3)/(r_2 - r_3)$ , nos da el gradiente hidráulico entre los piezómetros. Por otro lado, las curvas de la figura 7, nos dan las concentraciones integradas del trazador y por tanto podemos obtener la velocidad media  $V_{23}$  en la distancia  $r_2 - r_3$ .

La permeabilidad  $P$  se obtiene a partir de la fórmula de Darcy.

La porosidad  $s$  se puede obtener en forma análoga a como la obtuvimos en el caso anterior.

Las únicas condiciones exigidas por este método son: líneas de flujo del trazador paralelas a las líneas de flujo y que el trazador debe de inyectarse ni muy cerca del sustrato impermeable, ni muy cerca de la superficie impermeable.

## ACUIFERO ESTRATIFICADO

Supongamos un acuífero con capas de permeabilidades diferentes; si no existe una capa impermeable que las divida en dos zonas claramente diferenciadas, es muy difícil obtenerlas permeabilidades mediante ensayos de bombeo.

MERCADO y HALEVY han creado una técnica que permite de terminar las permeabilidades de las diferentes capas (fig. 8).

Para ello, en el piezómetro 1 que sólo penetra en capa superior, se inyecta un trazador y se bombea a caudal constante  $Q$ , que estará formado por aportaciones de las dos capas.

Mediante un control continuo, se determina el tiempo -  $t_1$  hasta la llegada del trazador. Admitiendo simetría cilíndrica en el bombeo tendremos:

$V$  = volumen

$$V_1 = Qt_1 \quad \text{y}$$

$$V_1 = \pi r_1^2 b_1 s_1 \frac{Q}{Q_1} \quad \text{en la 2ª inyección}$$

$$\text{ya que } t_1 = 1 \frac{\pi r_1^2 b_1 s_1}{Q_1}$$

$$V_2 = Qt_2$$

$$V_2 = \pi r_2^2 b_2 s_2 \frac{Q}{Q_2}$$

y como caudales son proporcionales a - transmisibilidades:

$$V_1 = \pi r_1^2 b_1 s_1 \frac{T}{T_1}$$

$$T_1 = T \left( \frac{V_1 r_2^2 b_2 s_2}{V_1 r_1^2 b_1 s_1} + 1 \right)$$

$T$  se obtiene del ensayo de bombeo.

$$V_2 = \pi r_2^2 b_2 s_2 \frac{T}{T_2}$$

$$T_2 = T \left( \frac{V_2 r_1^2 b_1 s_1}{V_1 r_2^2 b_2 s_2} + 1 \right)$$

$$T = T_1 + T_2$$

$\frac{s_1}{s_2}$  se obtiene de los testigos de sondeo.

## VELOCIDAD HORIZONTAL

El caudal de agua que circula a través de una sección  $S$  de un acuífero de porosidad  $p$ , se relaciona con la velocidad  $V_t$  a la que se desplaza un trazador ideal  $Q = V_t \cdot P \cdot S$ , empleándose la porosidad total en vez de la eficaz, ya que el trazador se mezcla con la totalidad del agua existente.

$V_t \cdot p$  se denomina velocidad de filtración y se podría conocer a partir del gradiente hidráulico y la permeabilidad del acuífero mediante la ecuación de Darcy, pero la determinación exacta de la permeabilidad es costosa, problemática.

De aquí que se prefiera el empleo de trazadores, estos se emplean según tres métodos básicos.

Método el tiempo de tránsito, basado en el tiempo que tarda el trazador en llegar del pozo de inyección a una serie de piezómetros, que se disponen alrededor del pozo de inyección ya que el sentido del flujo no se suele conocer con total precisión.

Método de dilución. Se obtiene la velocidad de circulación horizontal con la disminución en función del tiempo de la concentración de trazador colocada en el piezómetro.

Método de bombeo. Se inyecta el trazador, se deja transcurrir un cierto tiempo para que el trazador se separe una distancia del piezómetro y esta distancia se determina por bombeo. Es un método similar al empleado para el cálculo de la dispersividad.

El método más empleado es el de dilución, que inicialmente se empleó por su autor O.J. COCHERIN, con soluciones de cloruro sódico.

## Método de dilución:

### Principio básico

Sea un tramo de la columna de agua  
(fig. 9) de diámetro  $\underline{d}$   
de altura  $\underline{h}$

Se inyecta trazador en una concentración C

Se supondrá que se cumplen las siguientes condiciones:

- 1) Flujo estacionario
- 2) El volumen  $V_0 = \frac{\pi d^2}{4} h$ , permanece constantemente con la misma concentración de trazador
- 3) La salida del trazador del volumen  $V_0$ , sólo tiene lugar a causa del flujo horizontal de velocidad  $\underline{dv}$ .

La variación de la concentración C de trazador en el volumen  $V_0$ , en función del tiempo será:

|              |  |  |  |
|--------------|--|--|--|
| Por lo tanto |  | $\frac{dc}{dt} = -\frac{C}{V_0} \cdot \frac{dV}{dt}$ | ahora bien, $\frac{dV}{dt} = Q$ ; el caudal Q que circule por una sección $S = hd$ |
|              |  | $\frac{dV}{dt} = Q = V_s \cdot hd$                   | siendo $V_s$ la velocidad del agua que circula por la sección $S=hd$               |

De las dos expresiones anteriores se deduce:

$$-\frac{dc}{c} = \frac{V_s \, hd}{V_c} \, dt$$

e integrando

$$\ln Ct = \frac{V_s \, hd}{V_c} t + \ln C_0, \text{ o bien}$$

$$\ln \frac{Ct}{C_0} = - \frac{V_s \, hd}{V_c} t \quad \delta \quad \frac{Ct}{C_0} = e^{- \frac{V_s \, hd}{V_c} t}$$

La velocidad  $V_s$  se relaciona con la del acuífero mediante un factor  $\alpha$   $V_s = \alpha V_t$ .

Siendo este factor la relación entre el caudal en el piezómetro y el caudal en una sección igual a  $S$  en el acuífero.

El piezómetro al instalarse produce, indudablemente, perturbaciones en el flujo.

El coeficiente (fig. 10), ha sido investigado por DROST. W, que da un valor:

$$\alpha = \frac{8}{\left(1 + \frac{K_3}{K_2}\right) \left(1 + \frac{r_1^2}{r_2^2}\right) + \frac{K_2}{K_1} \left(1 - \frac{r_1^2}{r_2^2}\right) + \left(1 - \frac{K_2}{K_2}\right) \left(\frac{r_1^2}{r_3^2} + \frac{r_2^2}{r_3^2} - \frac{K_2}{K_1} \left(\frac{r_2^2}{r_3^2} - \frac{r_2^2}{r_3^2}\right)\right)}$$

$K_1$  permeabilidad del tubo

$K_2$  permeabilidad del medio

$K_3$  permeabilidad del relleno

Si no hay relleno  $r_2 = r_3$  y  $K_2 = K_3$

$$\alpha = \frac{4}{1 + \frac{r_1^2}{2} + \frac{K}{K} \frac{3}{1} \left( 1 - \frac{r_2^2}{2} \right)} \text{ fórmula de OGILVI}$$

Si no hay tubo  $\alpha = 2$

### TECNICA DE TRABAJO

Normalmente, el volumen de medida  $V_0$  se acota dentro del piezómetro por dos topes accionados por aire comprimido, el sistema de medida, contador Geiger Muller o de centelleo, va situado en esta zona, el trazador se inyecta accionado por un motor, por una ampolla que se rompe, etc.

El fundamento de la colocación de los cierres, está en evitar flujos verticales dentro del piezómetro. A veces se acopla un agitador eléctrico, para homogeneizar rápidamente la mezcla.

Este sistema, posee el indudable problema de que al estudiar acuíferos muy homogéneos se han de hacer gran número de lecturas y por lo tanto de marcados

Los cierres sólo están dimensionados para actuar en sondeos de un determinado diámetro.

En vista de estos problemas, ha sido diseñado por el Gabinete de Aplicaciones Nucleares a las Obras Públicas un ingenioso sistema que une la baratura material, a la simplicidad de aplicación y a la posibilidad de estudiar toda la columna de agua con un solo trazado.

En esencia, consta de un tubo largo de plástico lastrado por el que se inyecta la solución radiactiva llenándolo completamente. A continuación, se extrae lentamente el tubo, - con lo cual se distribuye uniformemente el trazador por toda la columna (fig. 11).

Posteriormente se va subiendo a saltos el detector, la amplitud de los saltos está condicionada al mayor o menor grado de heterogeneidad que se suponga al acuífero.

Se emplean dos registradores. - Uno registra los datos del detector y otro una señal de corriente variable - con la profundidad.

Si la velocidad fuera tan elevada que impidiese el registro por haberse eliminado el trazador antes de introducir el detector, lo que se hace es - introducir tubo con trazador y detector simultáneamente, llevando la subida del detector desfasada en retraso de la subida del tubo con el trazador (fig. 12).

Esta técnica se ha revelado utilísima, ya que no hace depender la instalación del diámetro de sondeo. Su manejo es simplísimo. Los resultados se obtienen con gran rapidez.

Cuando se trata de acuíferos estratificados o con rocas muy compactas con flujos rápidos locales, aparecen blancos de trazador en estos lugares.

Cuando existen flujos verticales en el piezómetro, este método no es válido aunque podría verificarse este sistema en tubando con tubería ranurado sólo en el nivel que se quiere investigar.



## METODO DE BOMBEO

### ACUIFERO HOMOGENEO

En un pozo, sometido a recarga artificial con el fin de evitar flujos verticales, se inyecta un trazador. Tras esta inyección de trazador, se inyecta una cantidad de agua determinada, con el fin de que penetre el trazador en el acuífero.

Se deja a continuación en reposo el sistema un tiempo -  $t$ . Tras este tiempo, a consecuencia del flujo natural el trazador habrá sido transportado una cierta distancia  $r_m$  del pozo. Se comienza el bombeo a caudal constante  $Q$ . Por mediación continua de actividades, se calcula la curva de recuperación de trazador. Si aceptamos una simetría cilíndrica del bombeo, el trazador habrá recorrido la distancia:

$$r_m = \frac{Qt}{\pi b s}$$

$t$  es el tiempo transcurrido desde el comienzo del bombeo

$s$  es la porosidad eficaz

$b$  es la potencia del acuífero

$\frac{r_m}{t}$  sería en nuestro caso la velocidad de desplazamiento del agua

Ahora bien, ¿cuál es el tiempo  $t$  que se ha de tomar?.

Algunos autores recomiendan tomar el tiempo hasta el máximo de la curva de recuperación.

Ahora bien, este tiempo no es el más adecuado, debido a que el trazador sufre una dispersión radial y las sucesivas por

ciones de agua extraídas de cada zona al extraer un cierto volumen, llevarán el trazador cada vez más diluido. Se recomienda tomar el tiempo transcurrido hasta la recuperación del cincuenta por cien del trazador inyectado.

### ACUIFEROS ESTRATIFICADOS

Si se trata de acuíferos estratificados, la determinación de la velocidad horizontal no puede realizarse con las premisas anteriores.

La única condición que deben de cumplir los dos acuíferos, es que deben de tener permeabilidades muy diferentes,  $K_1$  y  $K_2$ .

La interpretación de los resultados se hará de acuerdo con el método de M. BOROWCZYK a base de aproximaciones sucesivas.

- 1.- En cada una de las estaciones se determina el tiempo de recuperación del 50% de trazador  $t_1$  y  $t_2$ .
- 2.- Con estos tiempos se calculan las distancias a que se habría desplazado el trazador supuesto el acuífero uniforme obtendremos así  $r_1$  y  $r_2$ .

$$r = \frac{Qt}{bs}$$

si  $t_1$  y  $t_2$  son los tiempos transcurridos entre la inyección y el bombeo, las velocidades serán:

$$V_1 = r_1/t_1 \quad \text{y} \quad V_2 = r_2/t_2$$

- 3.- A partir del gradiente hidráulico  $I$  y de la porosidad media  $p$ , se calculan mediante la ecuación de Darcy las permeabilidades correspondientes a cada velocidad:

$$K_1 = \frac{pV_1}{I} ; K_2 = \frac{pV_2}{I}$$

4.- De las ecuaciones:

$$\begin{array}{l}
 V_1 = \pi r_1^2 b_1 s_1 T/T_1 \\
 V_2 = \pi r_1^2 b_2 s_2 T/T_2 \\
 T = T_1 + T_2
 \end{array}
 \left| \begin{array}{l}
 \text{Se calculan} \\
 r_1 \text{ y } r_2
 \end{array} \right.
 \begin{array}{l}
 r_1^2 = \frac{Qt_1}{\pi b_1 s_1 (1 + \frac{T_2}{T_1})} \\
 r_2^2 = \frac{Qt_2}{\pi b_2 s_2 (1 + \frac{T_1}{T_2})}
 \end{array}$$

Con los espesores de ambas capas  $b_1$  y  $b_2$  y teniendo en cuenta que:

$$T_1 = b_1 K_1 \quad T_2 = b_2 K_2$$

se calculan nuevos valores de  $r_1$  y  $r_2$ . Con estos valores se recalculan  $V_1$  y  $V_2$  (segunda aproximación).

5.- Con los valores de  $V_1$  y  $V_2$ , se recalculan de nuevo  $K_1$  y  $K_2$ , se vuelve de nuevo a calcular  $r_1$  y  $r_2$  (operación 4) y estos valores divididos por  $r_1$  y  $r_2$ , nos dan las velocidades correspondientes a cada estrato  $V_1$  y  $V_2$ .

Este método es sólo aplicable, si en la curva de recuperación aparecen dos máximos indicativos de las recuperaciones sucesivas del trazador de cada una de las dos cargas. De esto se deriva la premisa inicial de dos niveles de permeabilidad muy distintas.

## FLUJOS VERTICALES DE LOS PIEZOMETROS

Frecuentemente se producen flujos verticales en los piezómetros; éstos flujos en general se deben a que el piezómetro comunica varios acuíferos entre sí o bien no es rigurosamente vertical.

Como se pueden determinar fácilmente con adición de radioisótopos éstos flujos, el método se emplea mucho, ya que - permiten obtener las siguientes informaciones:

Localización de zonas permeables

Determinación de caudales de salida y entrada de las diferentes zonas

Cantidad de agua intercambiada entre ambas zonas

Determinación de las diferencias de nivel piezométrico en los acuíferos

Perfil de la Permeabilidad de la zona en estudio.

Para la obtención de los datos, se colocan dos detectores de centelleo conectados a un sistema de medida el cual se conecta a un registrador gráfico (fig. 13), se inyecta el trazador por debajo de los dos detectores y observado el tiempo transcurrido entre los dos picos del indicador gráfico y conocida la distancia entre los detectores, se conoce la velocidad y conocida la sección, se conoce el caudal; aunque no se conociera la sección se podría calcular el caudal, simplemente calculando el número total de cuentas registradas por el contador, inyectando una actividad conocida A.  $Q = \frac{A}{EN}$ .

Utilizando otros dos detectores se puede determinar la cantidad de agua que puede penetrar en el piezómetro en la zona comprendida entre ambos.

## DIRECCION Y SENTIDO DEL FLUJO

Existen numerosos acuíferos donde no se dispone del mapa de isopiezas que nos da la dirección y sentido del flujo ; también puede ocurrir que exista un gradiente hidráulico extremadamente bajo que nos impida determinarlo, en estos casos resultan de gran utilidad los trazadores radiactivos.

Se han propuesto numerosas técnicas:

Un detector colimado, unido rígidamente al varillaje que se va girando desde la superficie; la respuesta más alta nos indica la zona hacia donde fluye el agua marcada.

Una variante es incorporar un pequeño motor al detector con colimador, el motor hace girar a saltos el aparato de medida, permaneciendo fijo el tren de sondeo.

Otras veces, sobre todo en sondeos de gran diámetro, donde es fácil obtener datos erróneos, se coloca el detector en un resorte que le obliga a girar pegado a la pared del sondeo, o bien a varios detectores formando un cilindro de diámetro ligeramente inferior al del sondeo.

P. Wurzel y P. Ward han propuesto un sistema ingenioso y simple, que consiste en emplear un trazador de cromo, la inyección se realiza muy lentamente, de forma que en las zonas donde se acumula el trazador hay una mayor fijación del cromo por desplazamiento electroólito en el cabezal de inyección, este cabezal luego se corta en porciones longitudinales y se mide la actividad.

---

J. NIEMCZYNOWICZ, ha empleado con éxito una película fotográfica que se introduce después de haber inyectado el trazador, en un cilindro de plomo coaxial al eje del sondeo. Se obtienen en general resultados bastante similares a los de los otros métodos.

Con este sistema se obtienen errores de unos 10 grados, actualmente su empleo está limitado solamente a sondeos con profundidades inferiores a los cincuenta metros. Un problema radicaría en los flujos verticales que tendrían que eliminarse con sistemas de cierre.